溫室內作物對風力通風影響之數值模擬

朱佳仁、藍廷維、蔡仁凱
國立中央大學土木工程學系

一、摘要

本研究利用風洞實驗及計算流體動力學模式研究溫室內作物對貫流通風之影響，研究成果發現作物會阻礙氣流流經溫室，通風量會低於無作物之溫室，而阻礙效應與作物的密度、孔隙率有關。數值模式可使用孔隙阻力模擬作物對氣流之影響，利用風洞實驗量得之風速可校驗孔隙阻力模式中之係數，因此數值模式可正確地預測溫室內部作物後方的風場，並可量化溫室風力通風之通風量。此外，研究結果顯示：室內的作物以及溫室開口的防蟲網，皆會減弱室內風速及通風量。而縱深長的溫室，因為室內的摩擦阻力，通風量小於縱深短的建築物。

關鍵字：溫室，風力通風，計算流體動力學模式，風洞實驗，孔隙阻力

二、前言

臺灣地區夏季太陽輻射強、氣溫高，造成農業設施、溫室內部溫度過高，不適合作物的生長環境，故降低溫室內部溫度為溫室設計者及使用者必須考慮之因素(von Zabeltitz, 2011)。自然通風因為可以不耗費電力，廣為簡易型溫室所採用。但缺點是通風量隨室外大氣風速、風向、溫度而變，通風量不易控制(朱佳仁, 2006)。國外已有許多研究採用計算流體動力學模式(Computational Fluid Dynamics, CFD)研究溫室之通風與微氣候，如Reichrath& Davies (2002)及Norton et al. (2007)回顧了應用CFD於溫室的相關研究。

一些國外的研究(Majdoubi et al., 2009;Bournet&Boulard, 2010)指出溫室內的作物及開口的防蟲網皆會阻礙氣流的流動，降低通風量。但這些研究並未定量地評估作物及防蟲網通風量的降低效果，而國內尚未有作物及防蟲網對溫室通風影響之研究。本論文利用風洞實驗以及計算流體動力學模式研究溫室內作物對風壓通風之影響，並建立一個以阻抗概念的通風模式，可預測內部有作物之溫室的風力通風量，供溫室業者估算溫室的自然通風量。

三、材料與方法

本研究利用中央大學土木工程系的大型風洞來研究山形屋頂溫室內外的風場，圖1為該風洞之影像圖。溫室模型以透明的壓克力板製成，尺寸如圖2所示，縮尺比為1:20。模型前方的試驗段鋪設粗糙元、渦流產生器及阻牆製造入流流況成為紊流邊界

層流。本研究使用熱線流速儀(IFA300, TSI Inc.)量測來流之風速剖面，自由流風速U_o = 13.7 m/s，邊界層厚度= 1.55 m，指數n= 0.20。在模型前方，屋頂(H = 0.24 m)處的風速U_H = 10 m/s。溫室的表面風壓使用一台多頻道高頻率電子壓力掃瞄計(ZOC33/64PX, Scanivalve Inc.)量測建築物的表面風壓。實驗數據之取樣頻率為256 Hz，取樣時間為60秒，每個量測點共有15360筆數據。在風向垂直於屋脊(風向角= 0^o)狀況下，量測單棟與連棟溫室內部風速與表面風壓。

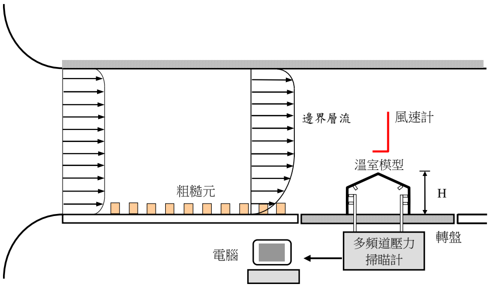

圖1.中央大學環境風洞影像圖及實驗配置圖

本研究亦採用大渦流模式(Large Eddy Simulation, LES)計算，控制方程式為連續方程式(Continuity eqn.)和那維爾-史托克(Navier-Stokes)方程式：

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \rho \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \rho g \delta_{i3} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu_{eff}\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right)\right] + f_d \tag{2}$$

式中下標 i、j = 1，2，3 代表 x、y、z 方向，$\overline{u_i}$ 為 i 方向之空間濾波後之速度，$\overline{p}$ 為壓力，t 為時間， ρ 為流體密度，g 為重力加速度，f_d 為流體所受的阻力，$_{eff}$ 為有效黏滯係數，定義如下：

$$\bar{\mu}_{eff} = \mu + \mu_{SGS} \tag{3}$$

其中 μ_{SGS} 是次網格尺度之紊流黏滯係數，與剪應力、網格特徵長度：

$$\mu_{SGS} = \rho (C_s \Delta_s)^2 \left(2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}\right)^{1/2} \tag{4}$$

其中 C_s 為 Smagorinsky 模式參數，剪應變率(Rate of strain)：

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \tag{5}$$

而 Δ_s 為空間濾波之尺度，與網格大小有關：

$$\Delta_s = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3} \quad (6)$$

其中 Δx 、Δy 、 Δz 分別為 x, y, z 方向的網格長度。作物的阻力以下式計算：

$$\rho f_{di} = \rho \left[-\alpha \frac{\nu}{d^2} \frac{(1-n)^2}{n^3} \langle u_i \rangle - \frac{\beta}{d} \frac{(1-n)}{n^3} \langle u_i \rangle^2 \right] \quad (7)$$

其中n為孔隙率，α、β 分別為作物的滲透係數(permeability)和慣性係數(inertia factor)，d為作物枝葉的特性長度。CFD模式配合適當的邊界和初始條件，利用數值方法計算各個網格點上的風速及壓力。本研究所使用的計算域和計算網格如圖3所示，網格總數為1,172,634。最小網格集中於溫室周圍之區域，x = 0.01 m，y = 0.01 m，z = 0.01 m，遠離溫室之處計算網格逐漸變大，收斂標準為10^{-5}。

四、結果與討論

圖4為在風向角 = 0^{o}(風向垂直於屋脊)時，單棟山型溫室迎風面、背風面外牆的風壓係數分布圖，顯示迎風面牆的風壓皆為正壓，背風面為負壓，且CFD模式預測與實驗結果相近。圖5為單棟空溫室內部中心線的水平向風速剖面圖，風速以模型前方(不受溫室干擾)屋頂高度z = H處的參考風速U_H = 10 m/s無因次化。由此圖可看出迎風面開口處風速稍小，氣流進入室內後，風速逐漸變大。

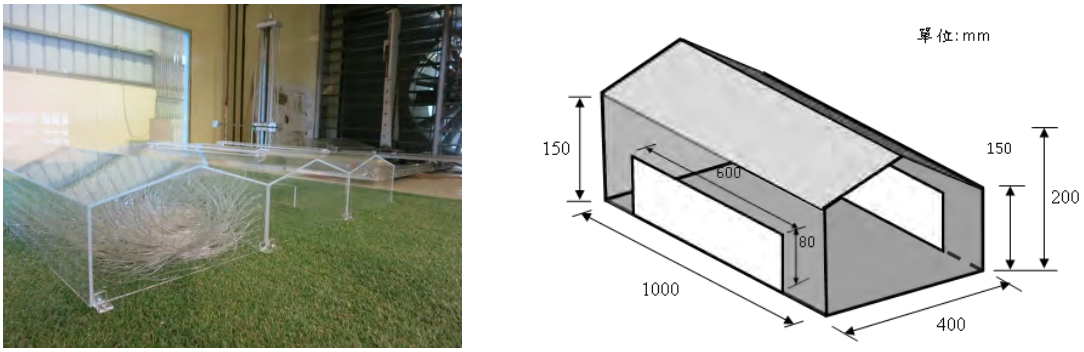

圖 2.山形屋頂溫室之示意圖與影像圖

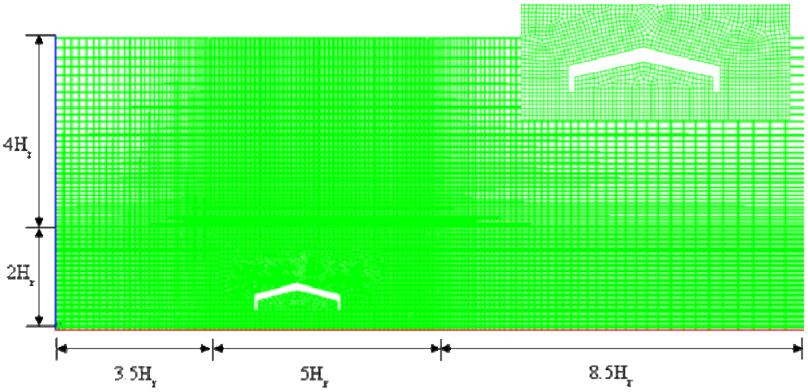

圖 3.山形屋頂溫室計算網格之側視圖

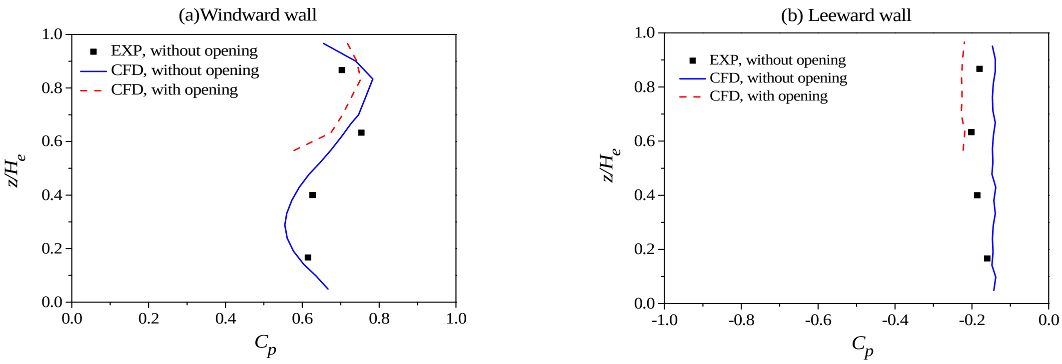

圖 4.單棟溫室外牆風壓係數比較圖(a)迎風面牆；(b)背風面牆

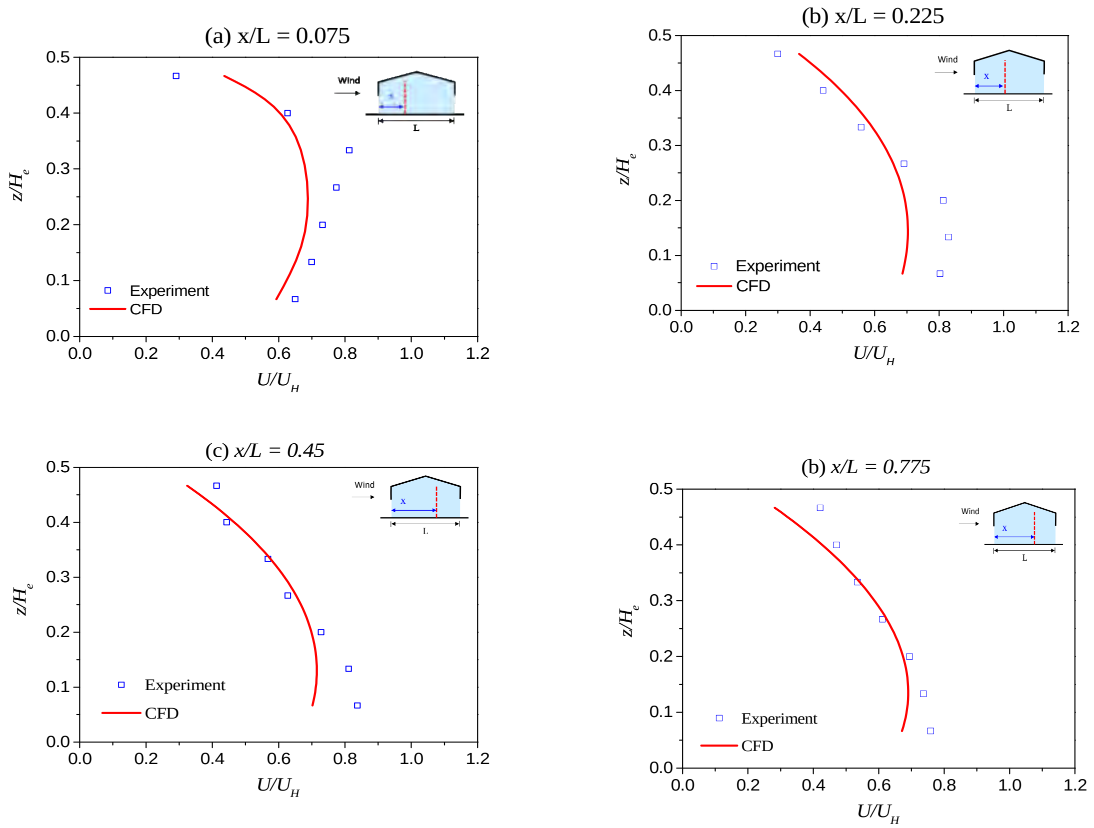

圖 5.單棟溫室內部風速(a) x/L = 0.08; (b) x/L = 0.23; (c) x/L = 0.45; (d) x/L = 0.78

圖6為單棟山形屋頂溫室內部放置縮尺植物模型，用影像處理的方式可量測得單排作物的孔隙率n = 0.37，雙排作物的孔隙率n = 0.187，三排作物的孔隙率n = 0.126。圖7比較在風向角 = 0^o時，CFD預測與風洞實驗量測之單棟溫室中心平面上(x/L = 0.65, 0.775)處風速，比較之後發現當係數$\alpha = 50$，$\beta = 0.02$最接近實驗結果。圖8為CFD預測之溫室內有單排、雙排作物中心平面上風速向量圖，由圖中可看出：作物後方的

風速變小，雙排作物減弱風速的效果尤其明顯。

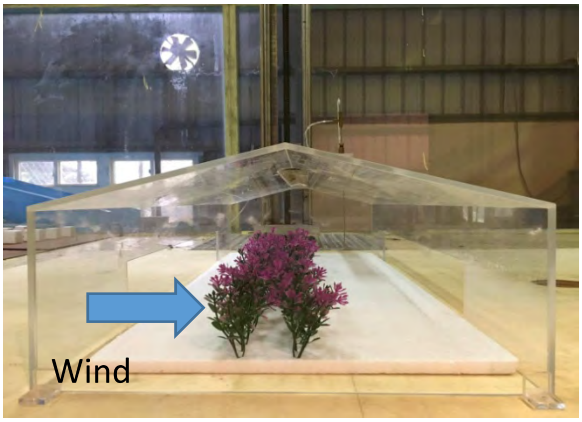

圖 6. 山形屋頂溫室內放置縮尺植物模型

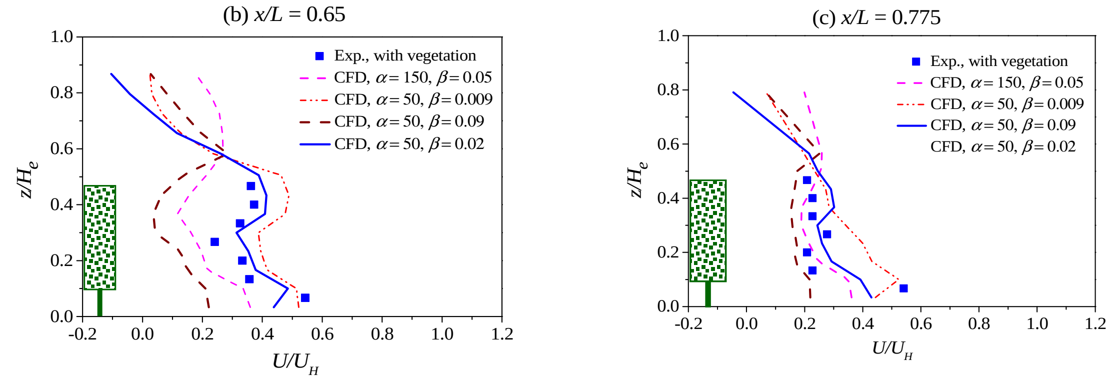

圖 7. 數值模式與實驗之開口中心線上水平向風速比較圖

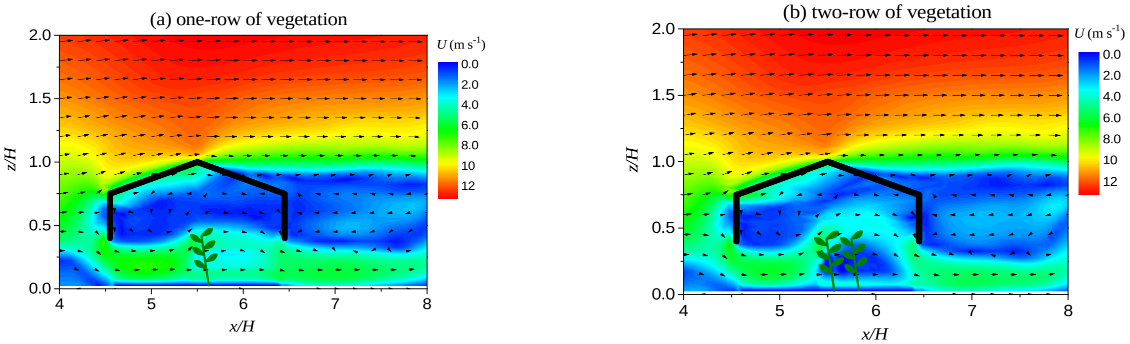

圖 8. 單棟山形溫室中心平面上風速向量圖(a)單排作物；(b)雙排作物

圖9為由CFD模式結果計算溫室內單排、雙排及三排作物的通風量Q，作物的排數愈多，孔隙率愈小，阻滯效果愈大，溫室通風量愈小，室內有三排作物的通風量為空

溫室通風量Q_o的60%。圖10為單棟溫室開口裝有防蟲網的室內風速，防蟲網後方的室內風速皆小於無防蟲網之風速，網目數目愈大，風速愈小。圖11為CFD模式預測之雙棟及三連棟溫室中心平面上的風速向量圖，圖12為連棟空溫室開口處的通風量Q，溫室縱深*L*/*H*愈長，通風量Q愈小。

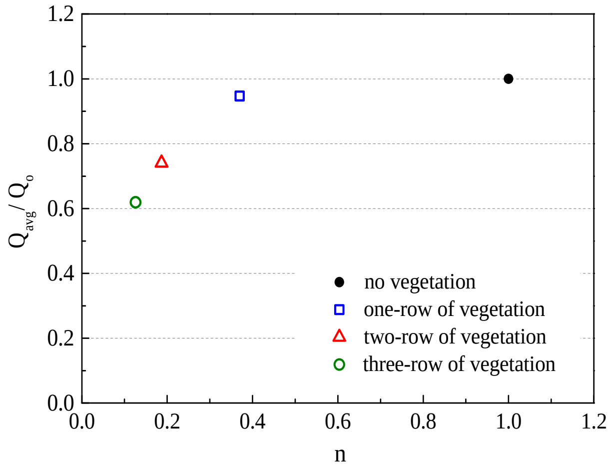

圖 9.溫室內單排、雙排及三排作物的通風量

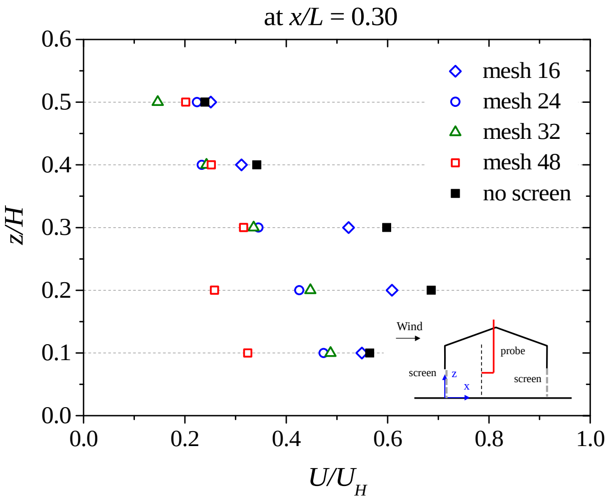

圖 10.單棟溫室開口有防蟲網的室內風速

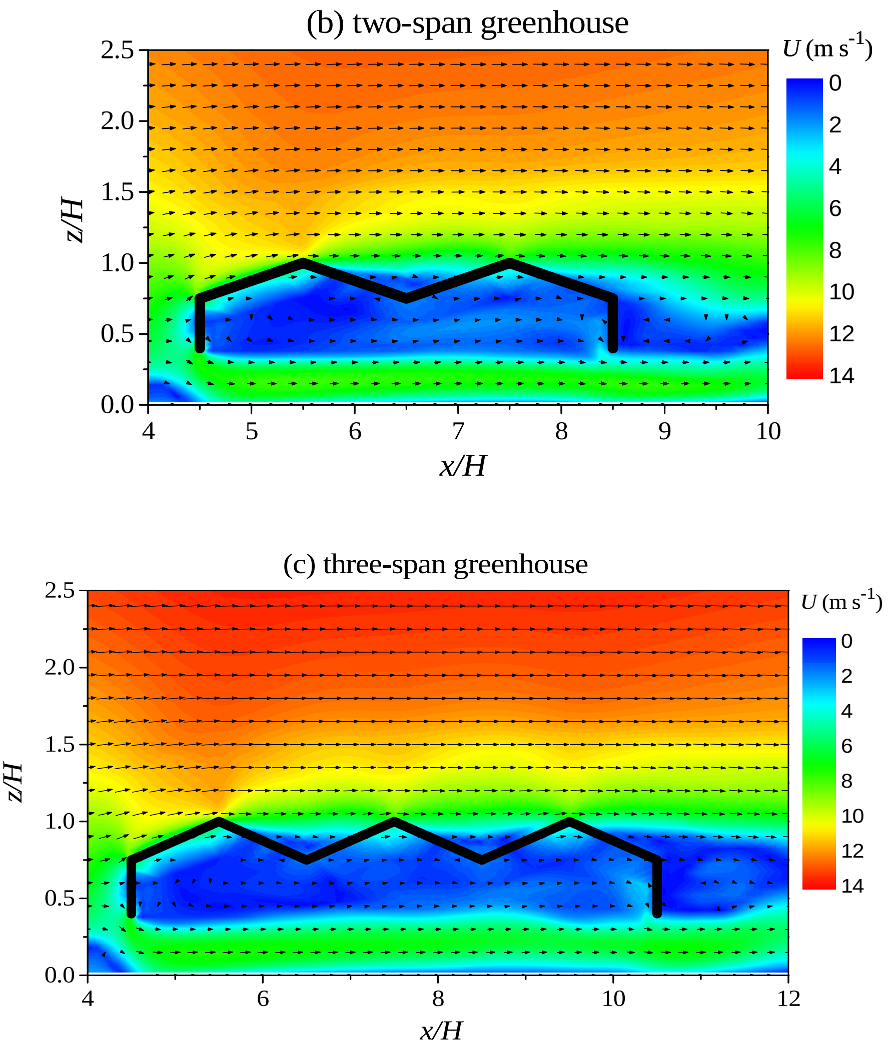

圖 11.雙棟及三連棟溫室中心平面上的風速向量

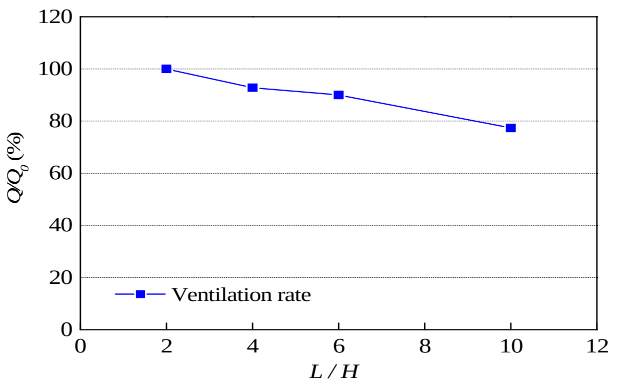

圖 12.連棟空溫室的通風量

五、結論

臺灣地處熱帶與亞熱帶之間，夏季炎熱，因太陽輻射的緣故，農業設施內部氣溫高於室外氣溫，不利於作物的生長。因此，溫室設計者及使用者必須了解如何利用自然界的風力來降低溫室內部的溫度。本研究採用計算流體動力學CFD模式與風洞實驗研究山形屋頂溫室的風壓通風，並使用孔隙阻力模式模擬溫室內部作物對風壓通風之影響，然而孔隙阻力模式中的係數必須藉由風洞實驗量得之風速校驗。研究結果顯示：風壓隨著溫室外型而變，不隨室內是否有作物而變。作物的排數愈多，孔隙率愈小，阻滯效果愈大，溫室通風量愈小，室內有三排作物的通風量為空溫室通風量Q_o的60%。同樣地，溫室開口裝有防蟲網後，室內風速減弱，通風量變小。而縱深長的溫室，因為室內的摩擦阻力，通風量小於縱深短的建築物。

六、參考文獻

1. 朱佳仁 (2006) *風工程概論*，科技圖書出版公司印行。
2. Bournet, P.-E. & T. Boulard. 2010. Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: A review of experimental and CFD studies. Computers and Electronics in Agriculture 74, 195-217.
3. Majdoubi, H.,T. Boulard, H. Fatnassi,& L. Bouirden. 2009. Airflow and microclimate patterns in a one-hectare Canary type greenhouse: An experimental and CFD assisted study, Agri. and Forest Meteorology, 149, 1050–1062.
4. Norton,T., D.W. Sun, J. Grant, R. Fallon, & V. Dodd. 2007. Applications of computational fluid dynamics CFD in the modeling and design of ventilation systems in the agricultural industrial: A review. Bioresource Technology 98, 2386-2414.
5. Reichrath,S. & T.W. Davies. 2002. Using CFD to model the internal climate of greenhouses: past, present and future. Agronomie 22, 3-19.
6. Von Zabeltitz, C. 2011. Integrated Greenhouse System for Mild Climate: Climate Conditions, Design, Construction, Maintenance and Climate Control. Springer-Verlag, Berlin.